

基于 HyperWorks 的核级 UPS 抗震强度分析

付明星^{1,*} 孟超² 许本福¹ 李静¹

(1. 中广核工程有限公司 深圳 518024; 2. 厦门大学能源学院 厦门 361022)

摘要 核级 UPS 是核电站的重要设备之一,对核电厂的安全稳定运行起重要作用。为保证设备质量和可靠性,核级 UPS 需要进行抗震强度分析,确保其通过抗震试验鉴定,使其满足当电厂实际发生地震的烈度在鉴定试验抗震响应谱的包络范围内设备能够安全运行。使用 HyperWorks 软件对核级 UPS 进行结构抗震强度分析,以确保其结构设计满足核级设备的抗震要求。

关键词 核级, UPS, HyperWorks, 抗震强度分析, 地震响应谱

DOI:10.15935/j.cnki.jggcs.2016.03.013

Anti-earthquake Analysis of Nuclear-class UPS Based on HyperWorks

FU Mingxing^{1,*} MENG Chao² XU Benfu¹ LI Jing¹

(1. China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Shenzhen 518024, China;

2. School of Energy Research, Xiamen University, Xiamen 361022, China)

Abstract The nuclear-class (1E class) UPS as the significant power supply in nuclear power plant, plays a dual role in protecting and controlling the power supply, which is vital to the safe and stable operation of nuclear power plants. In order to improve reliability of power supply, UPS of nuclear power plant requires enough anti-earthquake ability, which means that the mechanical properties of the UPS during the process of designing and producing should be fully considered. What's more, for ensuring the safe operation of equipment, it is indispensable for effective structural strength analysis and anti-earthquake analysis to make UPS cover earthquake response spectrum of given. In this paper, we innovatively use HyperWorks software into structural anti-earthquake intensity analysis of nuclear-grade UPS, to ensure the structure design satisfies the demands of nuclear-class devices.

Keywords nuclear-class UPS, HyperWorks, anti-earthquake intensity analysis, earthquake response spectrum

0 引言

《核电中长期发展规划(2005—2020年)》明确要求加快核电设备的自主化设计与制造,将积极推进核电建设作为我国政府确定的能源建设的一项重要政策。

核级 UPS 设备作为核电厂的重要电源设备,兼顾控制电源和保护电源的双重作用,对核电厂的安全稳定运行起重要作用。为保证设备的质量

和电厂的供电可靠性,GB/T 13625、HAF J0053 等标准要求对核级 UPS 进行抗地震鉴定试验。这就需要在设计过程中对设备进行有效的结构强度分析和抗震分析,使其能够满足所处楼层地震响应谱的抗震要求,确保设备在实际地震条件下可以安全运行。

HyperWorks 是一款专业的有限元仿真软件,常应用于汽车^[1-2]、大型机床^[3]、风电^[4]、飞机^[5-6]、航天^[7]等重工领域对象的仿真及优化处理。本文创新性地使用 HyperWorks 软件对核级

收稿日期: 2016-01-14

* 联系作者, Email: fumingxing@cgnpc.com.cn

UPS 进行结构抗震强度分析,验证所设计的 UPS 结构满足抗震响应谱的设计要求。

1 核级 UPS 组成

核级 UPS 为一套三相输入单相输出 160 kVA 的电源系统,由整流进线柜、整流柜、旁路稳压柜、逆变柜等部分组成。其主电路拓扑如图 1 所示,采用输入输出双隔离、12 脉整流、全桥逆变的结构。

核级 UPS 采用输入输出双隔离结构,可以减少输入交流电源、输出负载和 UPS 间的相互干扰。设备整流部分采用 12 脉整流结构,由 12 脉

整流变压器和两组 6 脉波可控硅半控整流器组成,两套整流器并联组成 12 脉波整流器。相对于常规 UPS 通用的 6 脉冲整流器,采用 12 脉波整流器可以将输入电流谐波畸变率降低至 15% 左右,大大减少 UPS 对电网产生的谐波干扰。逆变部分采用全桥逆变结构,每个桥臂由两组 IGBT 模块并联冗余,将直流母线电压变换为 PWM 波形输出,再经过滤波器滤波和变压器升压后输出。整机控制采用 TI 公司的 TMS320F28335 作为主控芯片,实现模拟信号的数字处理、控制算法、PWM 信号输出和相关保护等功能,保证设备具有完善的功能和控制性能。

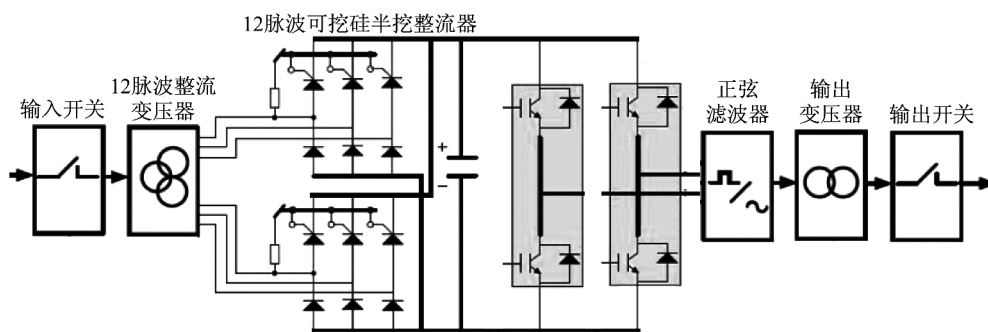


图 1 核级 UPS 电路结构

Fig. 1 Circuit structure of a nuclear-class UPS

2 HyperWorks 软件介绍

HyperWorks 是 Altair 公司的有限元结构分析和优化软件,可提供 CAE 建模、多体仿真、优化分析和过程自动化等庞大功能。HyperWorks 集成的开放式、可编程工作平台可以直接运用 CAD、CAE 求解技术,并内嵌与产品数据管理以及客户端软件包交互的界面。HyperWorks 主要包含 Altair HyperMesh、Altair MotionView、Altair HyperGraph、Altair HyperForm 和 Altair HyperOpt 等模块。

目前 HyperWorks 常应用于汽车、大型机床、风电、飞机、航天等重工领域对象的仿真及优化。在电力电子领域,由于设备整体尺寸通常较小,且多采用分离式结构设计,较少使用该仿真软件。然而本文所设计的核级 UPS 包含整流进线柜、整流器、旁路稳压柜、逆变器部分,整机尺寸达到 4 600 mm(宽)×1 000 mm(深)×2 200 mm(高),且整体框架采用金属焊接一体成型,通用的仿真软件输出

结果的准确性、真实性有限,只有使用专业的有限元仿真软件才能得到有指导意义的结果。因此选用 HyperWorks 软件对核级 UPS 的结构设计进行仿真分析、验证,取得了较好的效果。

3 核级 UPS 三维建模及材料参数设定

一般情况下,设计人员可利用其他较简单的三维软件来设计 UPS 的整体结构,如图 2 为通过 SolidWorks 软件建立的核级 UPS 逆变柜的模型。HyperWork 软件通过格式转换后,可直接打开这些三维软件的几何模型。

由于计算机资源和算法的限制,需要对核级 UPS 结构的模型进行简化。由于螺栓、螺纹等细节结构,对 UPS 整体结构的影响可以忽略不计,所以在建模时都不考虑这些细节结构。同理,对于那些对整机的功能和结构无影响的装饰件,也可进行忽略处理或简化处理。另外,风扇等附属件可简化为集中质量,施加在结构的相对应位置

上,模拟这些附属构件对整个结构产生的影响。考虑到 UPS 整体结构加工的简易性,在设计时尽量选用同一种材料,主体框架大部分使用 A3 钢(即 Q235),只有个别零件是其他材料,具体材料参数如表 1 所示。

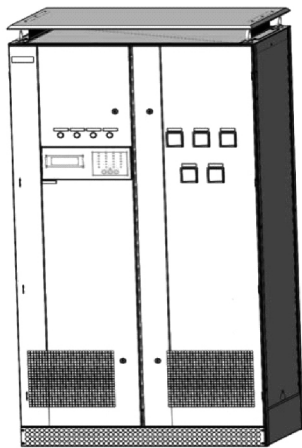


图 2 核级 UPS 逆变柜结构模型
Fig.2 Structure model of nuclear-class UPS inverter cabinet

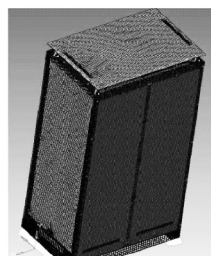
表 1 结构材料参数
Table 1 Structural material parameters

材料	密度/($\times 10^3$ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 /MPa	泊松比	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa
Q235	7.85	2×10^5	0.3	235	380 ~ 500
AL	2.7	6.9×10^4	0.33	41.4	110

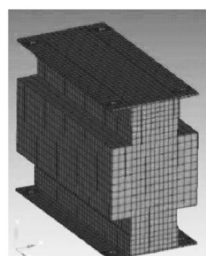
4 UPS 有限元模型及模态分析

4.1 基于 HyperWorks 的 UPS 有限元模型

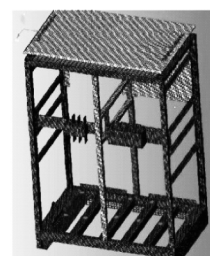
对于核级 UPS 的几何模型,通过格式转换,在 HyperWorks 软件里建立有限元模型,并采用壳体单元和实体单元对有限元模型进行网格划分。对壳体单元使用四边形为主的网格划分方法,获得了四边形为主的较为理想的有限元网格;对于实体单元,以六面体网格为主;对于不规则的零件,采用四面体网格。按此,分别建立 UPS 整机及关键部件的有限元模型,如图 3 所示。



(a) 整机有限元模型



(b) 变压器有限元模型



(c) 框架有限元模型

图 3 UPS 有限元模型

Fig.3 Finite element models of nuclear-class UPS

为获得较为精确的仿真结果,在设备的关键部位进行局部加密。螺栓孔处单元进行 washer 处理,螺栓连接采用刚性单元模拟;焊接采用刚性单元或者共节点模拟。有限元模型的单元总数为 923 215 个,节点总数为 625 289 个,质量为 2.247 t。

4.2 模态分析

有限元模型建立后就可以进行 UPS 的模态分析。根据 UPS 的实际安装情况,在底部的 4 颗 M20 处施加固定约束,模拟底座与地面的固定连接。在进行 UPS 模态分析时,需要注意固有频率和模态振型两个元素,它们是 UPS 结构的重要动力特征,对动力载荷结构的响应起关键作用。

表 2 和图 4 分别为采用 HyperWorks 软件的模态分析模块对 UPS 进行模拟计算出的结构 30 阶固有频率和前六阶振型。

由以上分析可知,UPS 的前 30 阶固有频率较低,且集中在 9 ~ 30 Hz,应避开地震试验的震动频率,以免引起共振效应。

5 核级 UPS 的抗震分析

标准《核电厂抗震设计规范》指出,核电厂中设施的地震作用和结构抗震验算应执行标准的相关要求。对于核级 UPS 这类箱式结构,假定结构为线弹性多自由度体系,采用振型分解反应谱法对其在地震下的抗震性能进行评估。对应于

表 2

自振频率列表

Table 2

List of natural vibration frequencies

阶数	频率/Hz	阶数	频率/Hz	阶数	频率/Hz	阶数	频率/Hz
1	9.067	7	16.06	16	23.44	25	29.27
2	12.66	11	19.88	17	23.91	26	29.73
3	13.29	12	19.93	21	25.29	27	31.57
4	15.64	13	20.66	22	26.22		
5	15.68	14	21.44	23	26.34		
6	15.97	15	22.98	24	28.88		

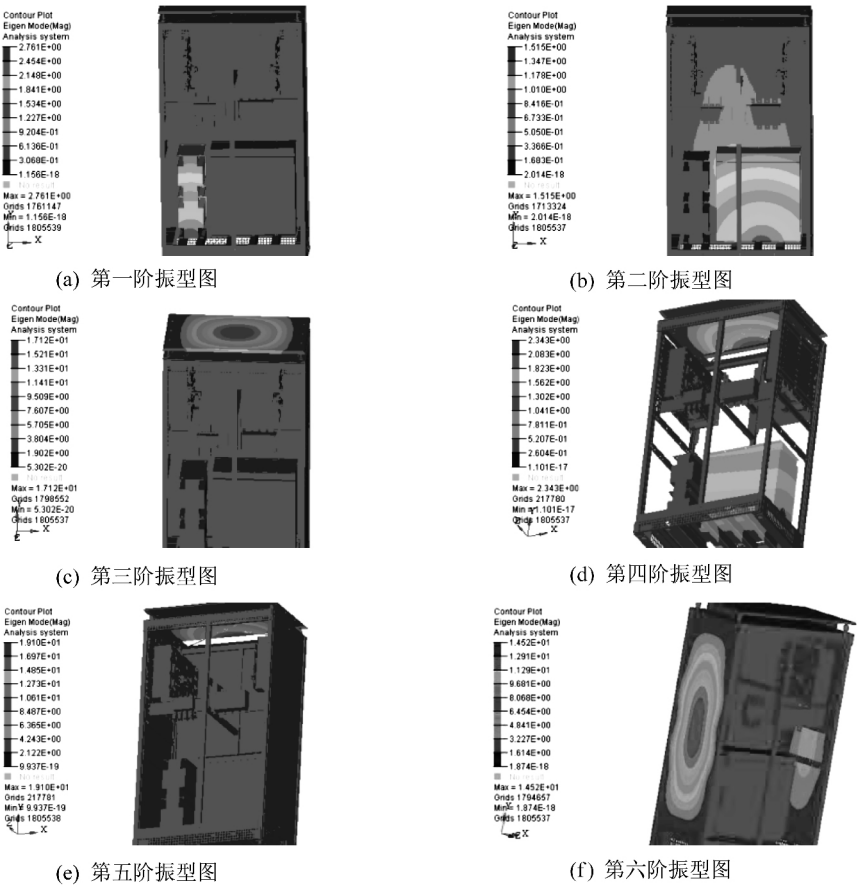


图 4 UPS 结构前六阶振型图

Fig. 4 The first-six order vibration modes of the nuclear-class UPS structure

HyperWorks 下的响应谱分析技术,通过将模态分析结果与确定的响应谱联系起来计算模型的应力。

5.1 载荷与约束及其响应谱

给定的核级 UPS 设备所在楼层抗震响应谱的水平方向和垂直方向数据分别如表 2、表 3 所示。

应用 HyperWorks 软件在 UPS 结构的两个水平方向上施加表 3 的加速度频率反应谱,垂直方向施加表 4 的加速度频率反应谱,计算地震作用下的应力和应力云图如 5.2 节所示。

表 3 水平方向加速度频率响应谱

Table 3 Horizontal acceleration frequency response spectrum

频率/Hz	加速度(5% 阻尼比) /g
0.2	0.04
1	0.42
3.45	1.25
6	1.65
8.4	1.65
16.4	1.1
50	0.3
100	0.3

表 4 垂直方向加速度频率响应谱
Table 4 Vertical acceleration frequency response spectrum

频率/Hz	加速度(5% 阻尼比) /g
0. 2	0. 02
3. 08	1. 04
10	1. 20
14	1. 20
50	0. 26
100	0. 26

5.2 应力分析结果

对于核电 UPS 设备 ,需要对较重的部件包括功率模组、变压器和电感等进行应力分析。本文以功率模组固定底板应力、功率模组固定横梁应力、固定变压器底座横梁应力和固定电感底座横梁应力为例来说明应力分析结果 ,这四处应力云图分别如图 5(a) -(d) 所示。

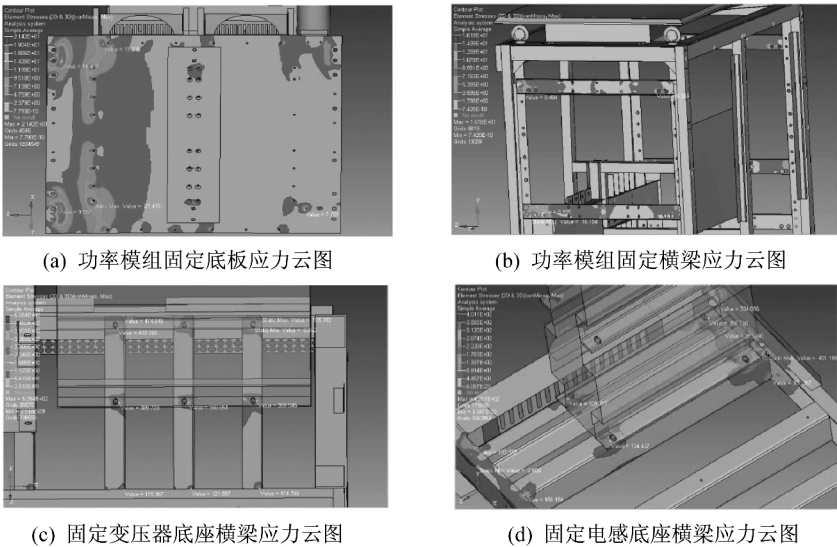


图 5 四处典型位置应力云图

Fig. 5 Stress nephogram of four typical positions

根据应力云图分析可知 ,功率模组(固定在立柱上) 底板的最大应力为 21. 42 MPa ,出现在底板与横梁连接的安装孔处。固定功率模组横梁的最大应力为 16. 18 MPa ,出现在横梁螺栓孔处。固定变压器底座横梁的最大应力为 505. 39 MPa ,出现在横梁与底座连接位置。横梁螺栓孔处最大应力为 432. 25 MPa; 固定电感的底座横梁的最大应力为 401. 116 MPa 出现在横梁与底座连接处固定电感的横梁螺栓孔处最大应力为 266. 718 MPa。

5.3 应力校正及优化

由表 1 知 ,核级 UPS 所采用的主要材料为 Q235 ,其屈服强度为 235 MPa ,抗拉强度为 380 ~ 500 MPa。通过 HyperWorks 的应力分析可知 ,固定变压器的横梁最大应力为 505. 39 MPa ,已超过材料抗拉强度 ,达到发生破坏的程度; 固定电感的横梁最大应力为 401. 116 MPa ,超过材料屈服强度 ,达到发生塑性变形的程度。其他部件的应力

在正常范围。所以 ,利用 HyperWorks 对核级 UPS 结构进行抗震分析 ,得出以下结论:

- (1) 在给定的地震响应谱作用下 ,除个别零部件外 ,UPS 的整机结构设计能满足抗震要求;
- (2) UPS 的风扇、铝散热器、模组、电容、电感等部件的安装位置应力较低 ,满足结构设计要求;
- (3) UPS 安装变压器、电感的横梁与底座连接处及螺栓孔处应力较大 ,多处区域超过屈服强度 ,发生塑性变形 ,个别区域甚至超过抗拉强度 ,有破坏风险。

基于以上分析 ,通过对 UPS 中存在结构设计风险的部件进行更换性能等级较高的材料 ,并进行结构上的加强处理 ,可提高其抗拉强度 ,降低局部应力 ,以满足抗震要求。

6 结 论

核级 UPS 设备为满足抗地震试验鉴定的要求 ,需要在设计过程中对其进行有效的结构强度

分析和抗震分析。本文的使用专业有限元仿真软件 HyperWorks 对核级 UPS 进行结构抗震强度分析,得出以下结论:

(1) 在 HyperWorks 软件里建立核级 UPS 的有限元模型,并采用壳体单元和实体单元对有限元模型进行网格划分。对于壳体单元使用四边形为主的网格划分方法,对于实体单元以六面体网格为主,对于不规则的零件采用四面体网格。

(2) 根据给定的核级 UPS 设备抗震响应谱,通过 HyperWorks 对核级 UPS 结构进行抗震分析,得到各个部位的应力云图。将结构应力与材料的屈服强度、抗拉强度相比较,可确认各部件的结构状态。

(3) 基于 UPS 整机及部件的结构状态分析结果,通过对设备中存在结构设计风险的部件进行结构加强处理,提高其抗拉强度,降低局部应力,以满足抗地震要求。

参考文献

- [1] 董学勤,辛勇,杨凡. 基于 Hyperworks 的汽车车架有限元建模及刚度分析[J]. 机械科学与技术, 2008, 27(7): 905-908.
Dong Xueqin, Xin Yong, Yang Fan. On finite element molding of a vehicle's frame using hyperworks [J]. Mechanical science and technology 2008 27(7): 905-908. (in Chinese)
- [2] 孔振海,王良模,荣如松. 基于 Hyperworks 的某轻型汽车前桥有限元分析及疲劳寿命预测[J]. 机械设计与制造 2013 2: 97-100.
Kong Zhenhai, Wang Liangmo, Rong Rusong. Finite element analysis and prediction on fatigue life of front axl of a light vehicle based on hyper works [J]. Machinery Design and Manufacture, 2013, 2: 97-100. (in Chinese)
- [3] 蒋澄灿,芮延年,陈闯. 大尺寸超精密非球面车磨复合机床 Z 轴系统稳定性分析[J]. 机械科学与技术, 2014, 33(4): 531-535.
Jiang Chengcan, Rui Yannian, Chen Chuang. The Z axis system stability analysis of large aspheric car grinding compound machine tool with ultra precision [J]. Mechanical science and technology, 2014, 33(4): 531-535. (in Chinese)
- [4] 姚兴佳,杨云东,单光坤. 基于 Hyperworks 的 3MW 风电机组轮毂的结构优化[J]. 沈阳工业大学学报, 2011, 33(6): 623-628.
Yao Xingjia, Yang Yundong, Shan Guangkun. Structure optimization of 3 MW wind turbine hub based on hyper works [J]. Journal of Shenyang University of Technology 2011 33(6): 623-628. (in Chinese)
- [5] 洪清泉. 现代飞机性能设计的新平台 Hyperworks [J]. 航空制造技术 2010 3: 84-85.
Hong Qingquan. Hyper works for modern aircraft design [J]. Aeronautical Manufacturing Technology 2010 3: 84-85. (in Chinese)
- [6] 姚旭. Hyperworks 在飞机结构优化设计中的应用[J]. CAD/CAM 与制造业信息化 2012 8: 54-56.
Yao Xu. Application of Hyperworks in optimization design of aircraft structure [J]. CAD/CAM and Manufacturing Informatization 2012 8: 54-56. (in Chinese)
- [7] 郝宝新,周志成,曲广吉. 大型航天器桁架式承力结构构型拓扑优化设计[J]. 航天器工程, 2014, 23(2): 44-51.
Hao Baoxin, Zhou Zhicheng, Qu Guangji. Research on configuration topology optimization for main truss structure of large spacecraft [J]. Spacecraft Engineering, 2014 23(2): 44-51. (in Chinese)